

文章编号: 1005-0329(2002)04-0023-06

技术进展

# 基于 MEMS 的微流体机械研究进展

王沫然 李志信

(清华大学,北京 100084)

**摘要:** 介绍了近十年特别是近三年以来微流动系统研究的最新成果,具体介绍了新型微加速度计、微泵、微喷、微阀、微通道及微系统的结构、原理及应用情况,并对微流动系统研究中存在的问题和发展方向作了简述。

**关键词:** MEMS;微流动系统;微加速度计;微泵;微喷;微阀;微通道

**中图分类号:** TK16,TH20

**文献标识码:** A

## Investigation Progress in MEMS - based Micro Fluid Machinery

Wang Moran Li Zhixin

**Abstract:** The newest progress in micro flow system is introduced, which includes new type of micro accelerometer, micro pump, micro nozzle, micro valve, micro channel and micro system. The structures, the mechanisms and the applications are provided. The problems in research and the trend of development are discussed.

**Key words:** MEMS;micro flow system;micro accelerometer;micro pump;micro nozzle;micro valve;micro channel

### 1 引言

微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical-Systems)是指基于(但不限于)IC工艺设计并制造、可批量生产、集电子元件与机械器件于一体的微小系统<sup>[1,2]</sup>。微流动系统是MEMS的一个重要分支,是构成大多数微系统中感应元件和执行器的主要组成部分,它包括微传感器、微泵、微阀、微喷和微通道等。在MEMS发展的初期,人们把主要精力都放在微加工技术上,随着硅加工技术的日益成熟,人们发现制约MEMS发展的不再是加工手段,而是微系统中出现的与宏观尺寸下不同的、人们尚未认识清楚的诸如流动和换热等基本问题。正如Mohamed在一篇技术报告中指出,“技术的发展速度超出了人们对存在其中的内部机理的理解能力<sup>[3]</sup>”。因此,近年来,对微流动系统的研究受到了前所未有的重视,同时也取得了巨大的成就。美国国防部高级研究计划局对

MEMS的市场分析及对未来的预测表明,在未来的几年里,微流体机械的市场份额将占整个MEMS市场份额的一半以上<sup>[4]</sup>。

作为MEMS的一个组成部分,微流动系统同样具有集成化和批量生产的特点,同时由于尺寸小,可减小流动系统中的无效体积,降低能耗和试剂用量,而且响应快,因此有着广阔的应用前景。例如流体的微量配给、药物的微量注射、微集成电路的冷却及微小卫星的推进等。下面对微流动系统的几个重要部分分别加以介绍。

### 2 微加速度计

微加速度计在汽车的安全系统、航天器的导航和姿态控制系统及生物医学监控系统中都有广泛和重要的应用。热对流加速度计是一种原理新颖的新型加速度计,它是基于密闭腔体内流体的自然对流进行工作的。图1所示为热对流加速度

收稿日期: 2001-11-26

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(59995550-2)

国家重点基础研究发展规划项目(G1999033106)

计的工作原理图,它主要包括装有气体的腔体、一个用来加热气体的加热丝,一对对称布置在加热丝两旁的温度传感器。当加热丝中通过电流受热升温时,流体的密度会因为温度发生变化而变化,若在如图所示的方向上不存在加速度,则两边温度传感器的显示温度相同,若在此方向(或相反方向)上存在一定的加速度,则在腔体内将会形成与加速度方向相同的自然对流,从而使两个温度传感器的显示温度出现差异。

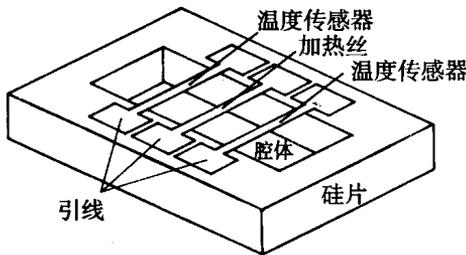


图 1 热对流加速度计的工作原理

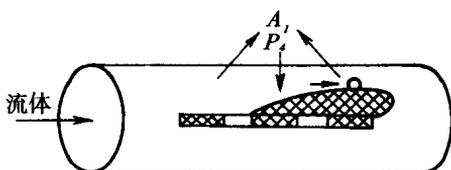
与传统加速度计相比,热对流加速度计的显著特点是结构紧凑简单、加工方便、成本低,对小加速度的敏感性很高, Billat 等人使用如图 2 所示的加速度计测量斜面上的加速度分量用以确定斜面的角度<sup>[5]</sup>,其加速度精度可达 0.1mg 左右。



图 2 电镜下的二维加速度计

### 3 微流量传感器

图 3 是一典型的基于温度变化的微型流量传感器的示意图。加热电阻后,由于流体的流动,使得其下游温度高于上游温度,两者的温差包含了流量信息。



传感器1 加热器 传感器2

图 3 基于温度变化的微型流量传感器

图 4 为 Ashauer 等人制造的基于温度的微流量传感器<sup>[6]</sup>,其可测的最小流量为 2mL/h,测量精度可达 10 $\mu$ L/h,热响应时间常数为 2ms。此流量计在医学及生物 MEMS 上有很重要的应用前景。

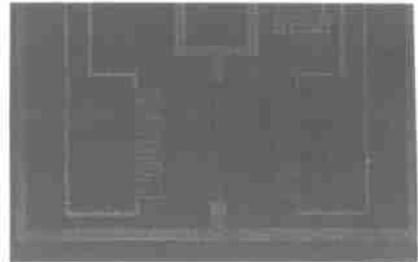


图 4 温度流量传感器器件电镜图

### 4 微泵

微泵作为一个重要的微流动执行器件,是微流动系统发展水平的重要标志。微泵根据其有无可动阀片可分为有阀型微泵和无阀型微泵。有阀型微泵往往基于机械驱动,原理简单,制造工艺成熟,易于控制,是目前应用的主流;无阀型微泵则常常利用流体在微尺下的新特性,原理比较新颖,更适于微型化,具有更大的发展前景。

#### 4.1 有阀型微泵

有阀型微泵一般是利用腔体容积的周期性变化和单向阀门进行工作的。根据驱动薄膜振动的方式不同,有阀微泵型泵可以分为压电驱动微型泵、静电驱动微型泵和热驱动微泵等。

图 5 所示为一种使用球形阀的压电片驱动微型泵<sup>[7]</sup>,它的特点是通过压力腔和内部流道的优化设计,来实现优化的流动状态。

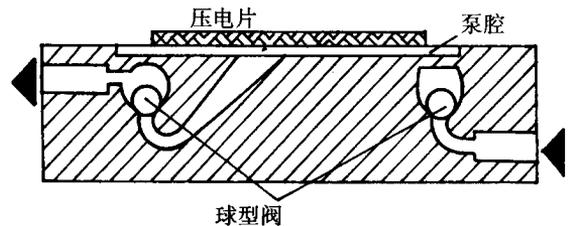


图 5 使用球形阀的压电片驱动微型泵

图 6 所示为一种静电驱动的微型泵<sup>[8]</sup>。其驱动频率范围是 1 ~ 100Hz,可以实现的最大流量为 350 $\mu$ L/min,最大背压为 2.4mH<sub>2</sub>O。图 7 所示为清华大学精仪系研究的双层结构双金属驱动微泵<sup>[9]</sup>,驱动电压为 16V,驱动频率为 0.9Hz 时,输出流量为 43 $\mu$ L/min。

#### 4.2 无阀型微泵

尽管有阀型微泵的工作原理较简单,易于控

制,制造工艺较成熟,但由于整个泵体中存在阀片等机械可动部件必然受到加工工艺和加工精度的限制,不利于微型化的发展趋势,而且由于阀片的频繁开关,泵体的可靠性和使用寿命也不高。相比之下,无阀型微泵由于其结构相对简单、制造工艺要求不高,因而有着独特的发展优势。无阀型微泵通常利用了流体在微尺度下的新特点。

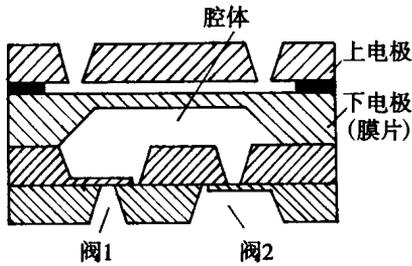


图6 静电驱动微型泵

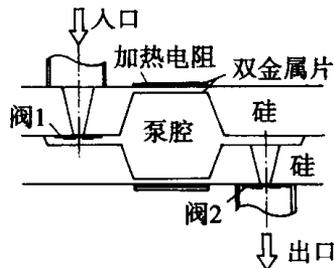


图7 双金属驱动微型泵

#### 4.2.1 收缩 - 扩张型微泵

收缩 - 扩张型微泵是一种比较典型的无阀微泵。它以收缩和扩张的不同形状通道代替了单向阀,利用因流道不对称所引起的压力损失的不对称性来实现流体的泵送,但这类泵的反向止流性能较差。Tsai 等人利用气泡的缩胀来驱动收缩 - 扩张型微泵<sup>[10]</sup>,其最大流量为  $5\mu\text{L}/\text{min}$ ,驱动频率为  $250 \sim 400\text{Hz}$ ,最大泵压为  $377\text{Pa}$ 。

#### 4.2.2 电液动力微泵(EHD泵)

电液动力泵的原理是通过诱导液体中的电荷运动而产生动量,带动流体运动。微型电液动力泵按其驱动电压类型可分为两种,一种是在平行电极间施加直流电压的 EHD 泵<sup>[11]</sup>,另一种是在电极阵列上施加不同相位行波电压的 EHD 泵<sup>[12]</sup>。EHD 泵的原理比较新颖,但这种泵对液体的导电特性有特殊要求,往往还需要在液体中注入离子,其应用受到很大限制。

#### 4.2.3 热驱动型微泵

热驱动微泵是利用流体的热特性,例如热胀冷缩或者相变来驱动工作流体。图8所示为利用流体受热相变来实现泵送的新型微泵<sup>[13]</sup>。通过对微细管内液体进行循环周期性加热,利用流体

周期性的相变可以使流体沿热源移动的方向泵送。对于特征尺度为  $200\mu\text{m}$  的微泵,其泵送流量可达  $34\mu\text{L}/\text{min}$ ,最大泵压可达  $20\text{kPa}$  以上。

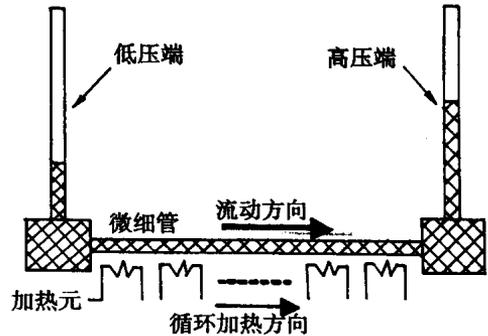


图8 相变型热驱动微泵

#### 4.2.4 基于粘性的微泵

由于尺度减小,流体的粘性特性也会发生变化,可以利用这一点来实现定向泵送。图9所示为一种新型的粘性泵<sup>[14]</sup>,这种泵利用由于旋转轴与上下两端壁面的距离不同,所造成的粘性力的不同从而实现定向的净流量。这种泵常常应用在两端压差很小时。

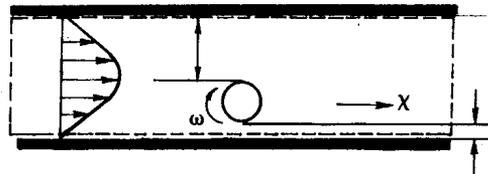


图9 新型粘性泵

利用流体粘性随温度的变化规律也可以实现微泵的定向泵送。对于液体来说,受热温度升高会使粘度下降。利用这一点,当膜片挤压流体时加热出口处流体,使之粘性阻力下降,使流体更易从出口流出,当膜片复原吸入流体时,加热入口处流体,是流体更易从入口处流入,这样就实现了流体的定向泵送。该微泵的测试泵送流量最大可达  $5.5\mu\text{L}/\text{min}$ <sup>[15]</sup>。

#### 4.2.5 双膜泵

这里的双膜泵不同于前面介绍的双金属膜微泵<sup>[16]</sup>,它是利用在两个膜的不同位置开孔,由于开孔的位置不同而造成的阻力不同,从而实现定向泵送。此泵不仅原理新颖,而且效率很高,对于体积为  $1.5 \times 1.5 \times 0.1(\text{cm}^3)$  的微泵,其流量可达  $30\text{mL}/\text{min}$ 。其结构和工作原理示意图10。

在微尺度下,流体的流动与常规尺度有许多不同之处,因此出现了许多基于不同新原理的新型微泵,除了本文介绍的之外,还有磁动力微泵(MHD)、电润湿微泵、离子动力微泵等<sup>[17~19]</sup>,本文

不一一举例。

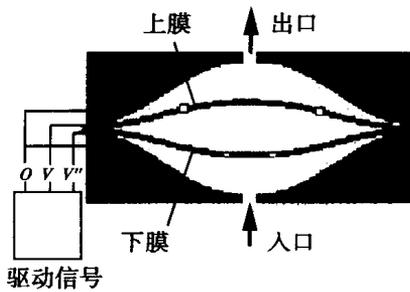


图 10 双膜泵的结构

## 5 微喷

微喷也是微流动系统的重要组成部分。由于它在喷磨打印机及液体雾化方面的广泛应用,传统微喷一直是研究中的一个重要课题。近年来,由于基于新型原理的合成喷以及一些高效喷在电子器件冷却、机翼主流动控制及微小卫星姿态控制等领域的重要应用,微喷再一次成为了人们关注的热点问题。

### 5.1 合成微喷

合成喷是由 Coe 等人首次提出并实现的一种微型流动器件<sup>[20-22]</sup>,其结构原理如图 11 所示。合成喷的结构非常简单,主要由一个腔体和一个驱动膜片构成。工质一般为气体,在驱动膜片对面的腔体壁上开一小孔或狭缝。当驱动膜片上下振动时,气体工质因腔内压力的变化而吸进或喷出,当膜片的振动频率足够大时,就会在孔外形成连续的射流场。据报道,主流区的最大喷射速度可达  $30\text{m/s}$ <sup>[24]</sup>。

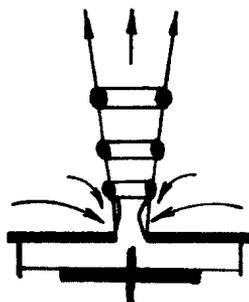


图 11 合成喷示意

合成喷结构简单、易于实现;净质量流量为零,无需流体输运;可以通过外在电参数来实现对合成喷喷射流场的控制;容易实现批量生产和集成。尽管存在能量效率不高的缺点,但由于以上提到的种种优势,合成喷在电子器件冷却和机翼主流场控制方面都有非常广阔的应用前景<sup>[23]</sup>。

### 5.2 高速高效微喷

使用 Laval 缩放喷管获得超音速气流的方法已经在常规尺度下应用得十分广泛而且成熟,在微尺度下,由于尺寸和粘性的影响,是否还能产生超音速气流曾经是人们的一个疑问,随着微加工技术的发展使足够光滑的微型 Laval 喷管成为现实,实验证明<sup>[24]</sup>,微型缩放喷管不仅可以产生高速气流,而且其推力/体积要比常规尺度下的喷管大几个量级<sup>[25]</sup>,具有非常好的应用前景。这种高速高效喷管可以应用于微小卫星的姿态控制及打印机的喷头等。图 12 所示为使用单晶硅加工的微喷管的侧面和出口截面图,喷管喉部为  $37\mu\text{m}$ <sup>[26]</sup>。

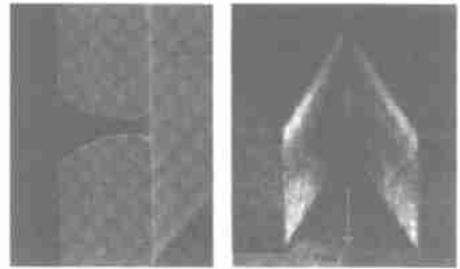


图 12 使用微加工工艺加工的超音速微喷管

## 6 微阀

阀门是实现流体控制的基本元件,是传统流动系统中不可缺少的部分。传统的微型阀可以分为被动阀和主动阀两种。传统的微型阀由于结构简单工艺比较成熟,在此不作详细介绍。以下介绍的是四种结构或原理新颖的微型阀。

### 6.1 高性能新型制止阀

由加州理工 Tai 等人先后研制了两种高性能新型制止微阀,其原理示意图如图 13 所示。前者为使用新型塑料聚对二甲苯制造的扭曲膜微型阀<sup>[27]</sup>,此阀的顺流冲破压力小于  $0.5\text{kPa}$ ,逆流的制止压力可达  $600\text{kPa}$  以上,性能非常好。后者为带封闭环的制止阀<sup>[28]</sup>,此阀的结构简单,逆流压力达到  $207\text{kPa}$  也不会出现可见的泄露现象,顺流方向上的冲破压力小于  $6.9\text{kPa}$ ,此阀集成到流动系统中的情况如图 21 所示,测试结果表明,此阀几乎可以达到一个理想的运行状态。

### 6.2 静电驱动气体微阀

图 14 所示为基于 Ta-Si-N 膜上的静电驱动的气体微阀工作原理图<sup>[29]</sup>,此微阀的尺寸为  $340 \times 40\mu\text{m}$ ,其工作压力可达  $0.2\text{MPa}$ ,远远高于其它静

电驱动的气体微阀,有很好的应用前景。

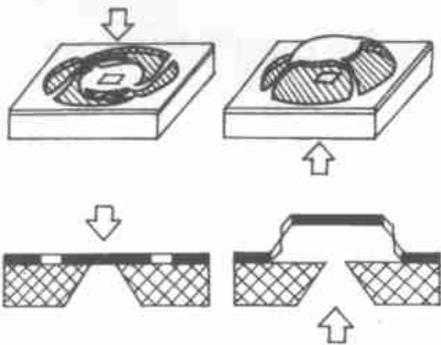


图 13 新型塑料扭曲膜微型阀的原理

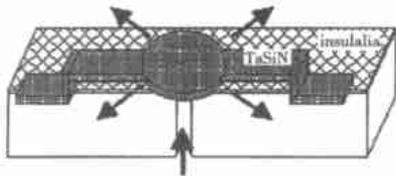


图 14 基于 Ta-Si-N 膜上的静电驱动的气体微阀工作原理

### 6.3 电流变流体微阀

在微尺度条件下的流动,粘性力起着越来越重要的作用。如图 15 所示,将 ER 流体理想化为柱状的可极化分子模型。当在微通道中的流动无电场作用时,如图(a)所示,流体分子都有朝流动方向一致的趋势;当流场中作用一与流动垂直的电场时,如图(b)所示,在极化的作用下,流体分子与流动方向垂直,从而导致流体的粘性增大。这就是所谓的电流变现象。利用这种现象可以制成微阀。报道中这种微阀的工作压力可达 0.17MPa<sup>[30]</sup>。

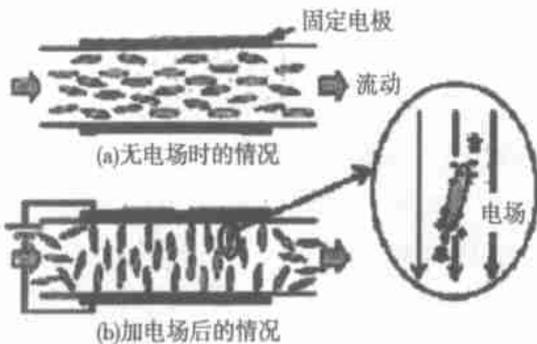


图 15 使用电流变流体微阀的原理

### 7 微通道

对 MEMS 系统中微通道内流体阻力的研究从未间断过,最近的研究主要集中于不同形状的微

通道转角的流动阻力和直通通道内微突起的阻力情况,因为这两种情况在 MEMS 中非常频繁的出现,很具有实用性。图 16 所示为 MEMS 系统中最常见到的三种类型的转角情况,图 17 则显示了三种转角的阻力测试结果及与理论分析的对比曲线<sup>[31]</sup>。图 18 为直微通道内不同大小的突起情况,图 19 所示为对应的阻力测试结果及与理论分析曲线的对比结果<sup>[32]</sup>。

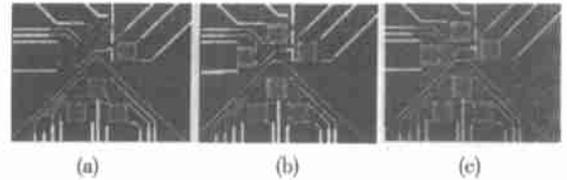


图 16 三种 MEMS 系统中常见的不同类型的转角

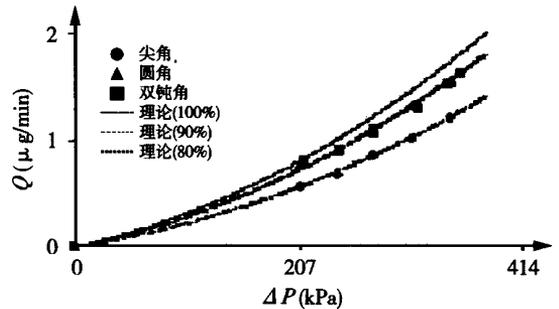


图 17 三种转角的阻力测试结果和理论分析对比

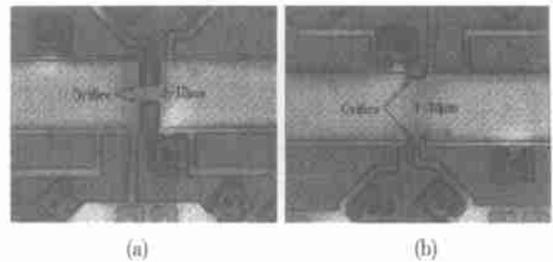


图 18 微通道内不同尺寸的突起

### 8 典型微流动系统

典型的微流动系统是集成多个流动器件(还可能包括 IC 控制系统),能够独立智能的完成一项或多项任务的流动系统。如图 20 所示为集成了微阀和微喷等的微推进器<sup>[33]</sup>,图 21 所示为集成了多种器件的火箭芯片<sup>[34]</sup>。

### 9 MEMS 对微流体研究的几点挑战

MEMS 技术的高速发展为微流动系统的研究

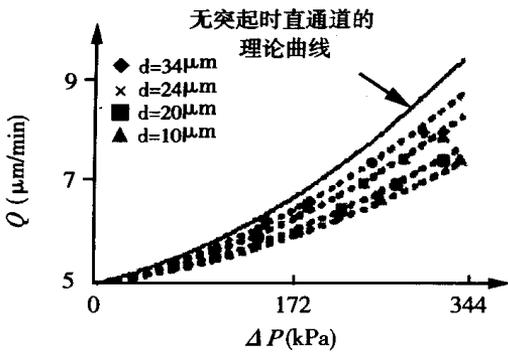


图 19 不同突起的阻力测试 results 和理论分析对比

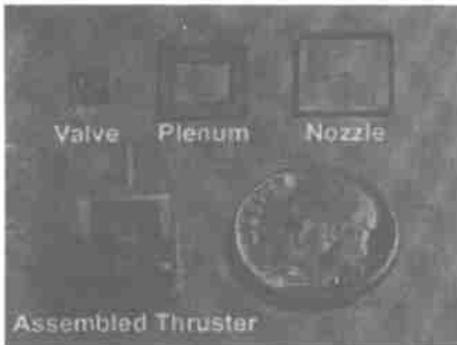


图 20 集成化的微推进器

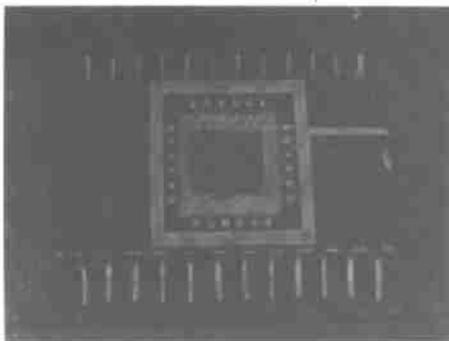


图 21 集成化的火箭芯片

提供了非常好的机遇和条件,同时也提出了更多的挑战。

9.1 方程适用性及边界条件

在微尺度下,方程的适用性问题是首先应该考虑的问题。对于气体流动,当气体的分子数密度低于一定值时(使得气体努森数大于 0.1),传统的 N-S 方程将不再适用;当分子数密度足够小时(努森数大于 10),气体流动符合自由分子流;而在这期间很大的范围内(称之为过渡区),目前还没有统一的方程可以对其进行求解。即使在连续性假设可以使用使用的情况下,由于流动滑移、热蔓延、粘性耗散、可压缩性以及一些在微尺度下才影响显著的分子间作用力等对边界条件的影响也应

该充分的考虑到。

9.2 尺度效应

尺度效应一般可分为力的尺度效应和物性的尺度效应。力的尺度效应近来是人们讨论比较多的热门话题,但各种文献中给出的力随尺度变化的关系却并不统一<sup>[35,36]</sup>,还需要理论和实验的进一步验证。物性的尺度效应由于实验条件的限制,目前研究也仅限于对粘性随尺度变化的一些奇异现象<sup>[37]</sup>,而且实验结果数据量少,也同样期待着大量实验的验证。

9.3 表面效应

表面效应通常是微流动研究中最关心的问题。表面效应可分为表面形貌效应和表面力效应。所谓表面形貌主要是指粗糙度对微通道内流动阻力的影响,这方面的研究人们做了很多工作,但结果不尽相同,有时甚至是相互矛盾的<sup>[38,39]</sup>。表面力效应则内容丰富得多,例如微尺度下的表面粘附力、表面摩擦力、表面吸收层问题以及表面亲和力等。虽然表面力效应大多数都可以从分子间作用力的角度合理解释,但有些具体的系统工作还没真正的展开,还有很大的发展空间。

9.4 分子模型

使用传统方程并加以适当修正的方法是解决微尺度下流动问题的行之有效的处理方法,但其最大的缺点是每一次修正都需要大量实验的验证。另一种可行的方法是使用基于“第一原理性方程”的分子模拟。分子模拟的方法主要有适用于液体和密集气体流动的分子动力学模拟(MD)和适用于稀薄气体的直接模拟蒙特卡罗方法(DSMC)。MD 方法在薄膜导热模拟以及 DSMC 方法在飞行器流动模拟以及微气膜模拟中都取得了巨大的成功<sup>[40~42]</sup>,在微尺度流动的模拟中,它们将接受新的考验并必将提供广阔的发展前景。

9.5 协同发展

作为 MEMS 系统的一部分,微流动系统受到了整个 MEMS 技术发展的支持与限制,如何与 MEMS 中其他领域研究相互配合、协同发展也是对微流动系统研究的另一重要挑战。

(参考文献 42 篇略,有需要者请与作者联系)

作者简介:王沫然,1977 年生,博士研究生,主要从事 MEMS 及微尺度流动和换热的研究。通讯地址:100084 北京清华大学工程力学系。Email: moralwang@mails.tsinghua.edu.cn.